

Numerical discrimination learning of object stimuli in rats

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00000192

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



ラットにおける物体刺激の数的弁別学習

上條 槇子¹⁾ 谷内 通^{1)a)}

Numerical discrimination learning of object stimuli in rats

Makiko KAMIJO¹⁾ and Tohru TANIUCHI^{1)a)}

Abstract Five rats were trained to respond to the third object of six identical objects arranged in a line. All rats could learn this task reliably when it consisted of one kind of object stimulus (A). Since spatial locations of objects were changed trial by trial, a spatial position of the stimuli could not be an effective discriminative cue. Utilization of olfactory cue of food reinforcers also could be rejected because food rewards were set in the rear of all stimuli but rats could get it only when a correct response was made. When the stimulus type increased to three (A, B and C), three of the five rats could learn this task reliably. In the transfer test, a novel object D was inserted as a probe test to the original training. On a probe trial, response to the second, third or fourth object were reinforced indifferentially. Chance performance as a result of additional learning to the novel test stimulus during repeated probe trial was 33.3%. Two rats showed reliable transfer to the novel test object. The results suggest that rats can encode abstract numerical features of object stimuli.

Keywords rats, counting, numerical competence, discrimination learning

我々ヒトは、数の概念を使用することにより、物理的特徴において異なる様々な刺激の集合に対して共通の数的処理を適用することを可能にしている。例えば、鉛筆とリンゴ、あるいは自動車は、形、色、大きさなど様々な次元の物理的特徴において異なるが、計数や演算などの共通の数的処理が可能である。対象から物理的特徴にとらわれない抽象的な数概念を抽出する能力は、ヒト以外の動物においても自然な生態の中で有用に機能する場面が考えられる。例えば、動物が巣穴を同定する際に、ある特定の地点から3番目の木の下に巣穴があるというように、抽象的な数的特徴を基にして処理することが可能であれば、季節ごとに木々の具体的な視覚的特徴に変化があっても、巣穴を正しく同定する上で有利であるかもしれない。

Gelman & Gallistel (1978, 小林他訳 1989)によれば、数の概念は、基数性と序数性に区分することができる。基数性という性質は、たとえば“3”を表す概

念や標識が“1”や“2”や“4”とは異なることを理解し、様々な対象に対して共通に適用できることである。すなわち、基数性とは、刺激の物理的特徴から独立した抽象的な数的特徴を抽出できることである。これに対し序数性とは、基数が“1, 2, 3, 4”と順番に序列を成しているという関係について理解できることである。すなわち、序数性とは、抽象的な基数の大小関係を正しく認識できることであるといえる。先のGelmanらによれば、ヒトは基数を表す言語を持つとし、これをニューメログ (numerog) と呼んだ。これに対し、ヒト以外の動物はニューメログを持たないが、数を同定する際に、非言語的な数的標識であるニューメロン (numerons) を使用できる可能性を指摘した。

実際に、数的標識の学習可能性について、様々な動物を対象として研究が行われてきている。たとえば、霊長目に関する研究では、チンパンジーが、スクリーン上に映し出された図形の数について、アラビア数字の書かれたキーを使用して反応できることや (Matsuzawa, 1985; Biro & Matsuzawa, 1999), 実験室内の3箇所中2箇所に隠されたオレンジの合計数をアラビア数字で反応可能であった例が報告されている

¹⁾ 金沢大学人間社会環境研究科

Graduate School of Human and Socio-Environmental Studies, Kanazawa University

a) E-mail: tohruta@staff.kanazawa-u.ac.jp

(Boysen & Berntson, 1989)。アカゲザルにおいては、スクリーン上に提示された様々な図形に対して、基数の大小判断が可能であることが示されている (Brannon & Terrace, 1998, 2000)。このアカゲザルの実験では、図形の面積や形、色などが手がかりにならないよう統制されたので、基数性と序数性の両者を満たした計数行動の例として考えることができる。鳥類では、ハトが、画面上の1個から5個までの刺激に対して、数を表すシンボルを用いて象徴見本合わせ課題を習得させた例が報告されている (Xia, Emmerton, Siemann et al., 2001; Xia, Siemann & Delius, 2000)。また、オウムを用いた実験では、様々な刺激の中から、特定の刺激の個数を音声言語で反応することや加算が可能であることが示されている (Pepperberg, 1994, 2012)。特に、霊長目や鳥類の研究では、訓練を受けた刺激だけでなく、新奇な刺激を用いても数に基づく反応が表れることにより、獲得された数的概念の抽象性が確認されてきた。

このようにチンパンジー、アカゲザル、ハト、オウムといった霊長目や鳥類では、数概念の抽象性である基数性についてある程度明確に証明され、さらに序数性に関する研究も行われ始めている。しかしながら、その他の種における計数能力に関する研究はあまり高度な水準まで達していないように思われる。たとえば、ラットでは走路での強化回数 (Capaldi & Miller, 1988)、身体への接触数 (Davis, MacKenzie, & Morrison, 1989)、純音数 (Davis & Albert, 1986; Breukelaar & Dalrymple-Alford, 1998)、床からの電撃数 (Davis & Memmott, 1983)、オープンフィールドにおけるトンネルの数 (Davis & Bradford, 1986; Suzuki & Kobayashi, 2000) などを用いた比較的多様な場面における計数行動について検討されてきた。これらの実験では、総提示時間や空間位置、距離などの数的特徴以外が有効な弁別手がかりにならないよう統制するために、音刺激の総提示時間やトンネルの空間位置を操作されていた。しかしながら、霊長目や鳥類で行われてきたような質的に異なる様々な刺激間での計数行動の転移を示した研究は報告されていない。したがって、ラットにおける多様な刺激間に共通する抽象的な数的手がかり、すなわち基数性の獲得に関しては十分に証明されているとは言えない。

そこで本研究では、ラットにおける物体刺激の数的弁別課題の習得と新奇刺激への転移について検討することを目的とした。1列に並べられた4個から6個の

同一の物体の中から、左から3番目の物体を選択させる報酬訓練を行った。3種類の物体刺激を用いた習得訓練の成立後に、新奇物体に対する転移を検討した。ラットが抽象的な基数性を獲得可能である場合には、新奇刺激に対して計数行動の有意な転移が生じることが予測される。

方 法

被験体 実験開始時に約160日齢のWistar系オスラット5匹を用いた。これらのラットはメスとの交尾経験を与える実験に使用された経験があったが、報酬訓練による弁別学習等の実験経験は持たなかった。実験期間を通して、実験で与えられる報酬以外の飼育飼料を1日に12gとする食餌制限下で飼育した。動物の飼育は、金沢大学動物実験委員会の承認を受けた施設と管理マニュアルの下で行われた。

装置 Figure 1に装置の概要を示した。本実験には、長さ135cm、幅82.5cm、高さ30cmの木製の弁別装置を使用した。装置の木製部分は艶消しの灰色に塗られていた。装置には1個の出発箱と、11個の目標箱が設置されていた。各目標箱は、長さ38cm、幅9cm、高さ12cmで、入口は塩化ビニール板のドアが封鎖していた。また、目標箱は床よりも15cm高い位置にあり、進入するためには飛び乗る必要があった。これはラットの弁別反応の正確性を高めることを目的として目標箱の進入に要する反応負荷を加えることを企図したものであった。目標箱の末端には直径5cmの皿を設置し、約30mgの米爆ぜ菓子を報酬として使用した。

Figure 2に使用した5種類の物体刺激を示した。物体刺激には茶色のガラスビン、ワイングラス、緑色の洗濯バサミ、金太郎型の人形、白半透明のプラスチックのボトルの5種類の刺激を用いた。物体刺激の訓練刺激への割り付けは被験体間で相殺した。刺激物体は長さ8cm、幅8cm、厚さ1mmの灰色の塩化ビニール板に接着して使用した。

手続き 予備訓練として、毎日3分間のハンドリングを18日間行った。同時にホームケージ内で10粒の米爆ぜ菓子を提示して馴致した。8日目と9日目に、20分間の装置の自由探索を行わせた。自由探索時には装置の床を目標箱の高さと同じ位置になるように調整した。すべてのドアを開放し、出発箱に2粒、オープンフィールド部分に10粒、各目標箱の床に2粒、皿に2粒の米爆ぜ菓子を置いて食べさせた。10日目

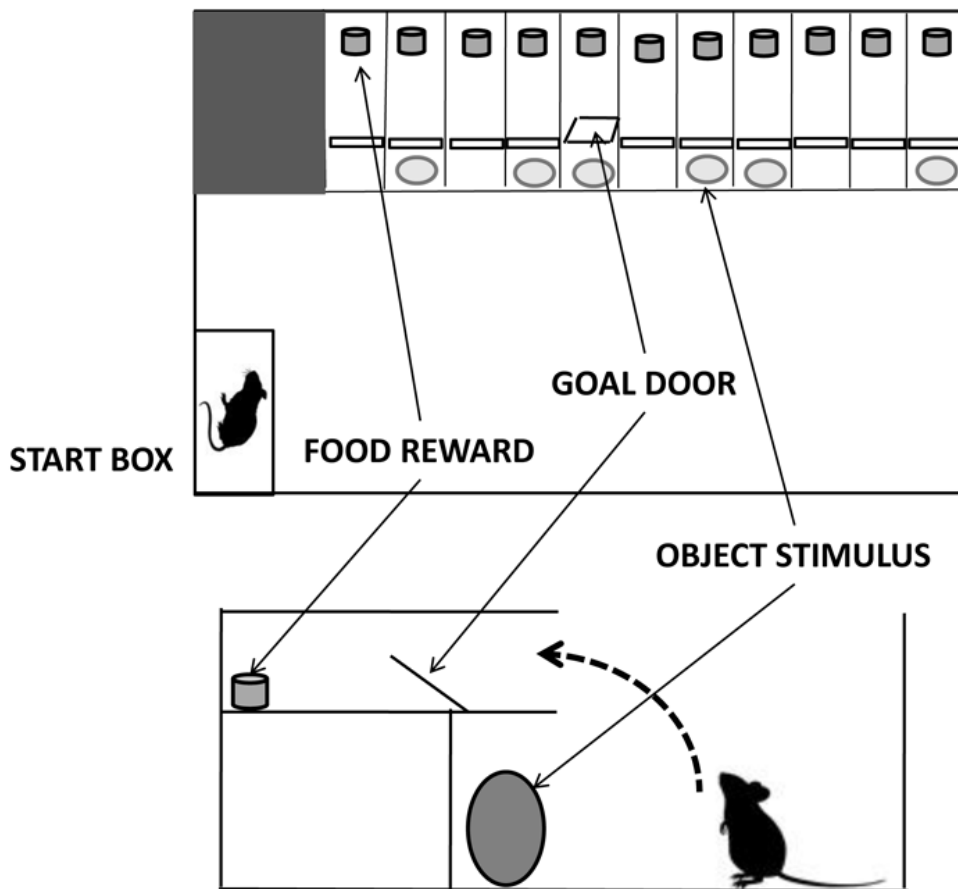


Figure 1 An outline of apparatus. Rats had to jump into the goal box and could eat food reward only when they chose the correct goal box.

と11日目には同じ手続きによる装置探索を1回10分間で1日に2回与えた。12日目から32日目まで反応形成を行った。反応形成では、11個の目標箱のうちの1つのドアを開放して、強制選択を行った。出発箱にラットを入れ、約3秒後にギロチンドアを開いた。ラットは目標箱に進入し、目標箱内の餌皿に置かれた4粒の米爆ぜ菓子を食うことができた。目標箱の入口ドアの開放部分を狭くして、最終的に完全に閉じたドアを通過できるよう訓練した。同時に、目標箱と同じ高さに調整していた床板を徐々に下げていき、最終的にラットが15 cmの高さの目標箱に飛び乗ることができるようになるまで訓練した。1日に22試行を行い、各目標箱を2回ずつ訓練に使用した。

予備訓練が終了した翌日から習得訓練を開始した。まず、刺激Aを用いて訓練を行った。11個の目標箱の

前に6個の同一の刺激物体をランダムに配置し、左から3番目の物体を選択させる弁別訓練を行った。餌報酬の嗅覚手がかりの統制のため、すべての目標箱内の餌皿に報酬を置き、正反応の目標箱においてのみドアが開き、報酬を得ることができるようにした。誤反応の場合はドアを開くことができず、内部には進入することができなかった。1セッションにつき24試行を行った。左から3番目の物体が置かれる可能性のある目標箱は、第3-8番目の6つの目標箱であるが、6試行ブロックでこれらの目標箱が正反応となるように調整し、1セッション内で各目標箱が正反応になる回数を等しく4試行ずつとした。訓練開始時は矯正法を使用し、誤反応の場合には、ラットは床に戻り、正反応に達するまで目標箱の再選択を行うことができた。再選択の回数に制限を設けない条件で48セッション



Figure 2 A photograph of object stimuli. The objects were glued on square gray PVC panels.

を行った。

誤反応時の再選択の回数に制限を設けない条件下で 48 セッションの訓練を行った後、再選択の回数を 1 回に制限した条件でさらに訓練を 14 セッション行った。すなわち、最初の反応が誤反応である場合に、ラットはもう 1 回の目標箱選択を許されたが、再選択も誤反応である場合は実験者が装置から取り出して試行を終了した。

刺激配列内の相対的位置関係、または、刺激配列の右からの計数の可能性を評価するため、物体総数を 4, 5, 6 個に変更するテストを行った。3 試行ごとに無作為な順序で物体総数を 4, 5, 6 個に変更する訓練を 29 セッション行った。矯正法による再選択は 1 回に制限された。

次に、物体刺激の種類を 3 種類 (A, B, C) に増加させた。刺激物体の組み合わせは、被験体ごとに変更した。連続する 2 セッションで 20 回の正反応数 ($20/48=41.7\%$) を学習基準とした。刺激 A, B, C の 3 種類を用いた訓練試行が学習基準に達した同日に、刺激 A, B, C, と新奇刺激 D を用いた馴致を行った。馴致は長さ 60 cm, 幅 30 cm, 高さ 36 cm の透明な水槽に刺激 A, B, C, D の物体を 1 個ずつ置き、ラットに 10 分間の探索を行わせた。

習得訓練完了の翌日から転移テストを行った。転移テストは刺激 A, B, C を用いた訓練内に、新奇なテスト刺激 D を用いたプローブ試行を挿入した。テスト試行では刺激物体の左から 2, 3, 4 番目の刺激物体への反応を強化した。転移テストは、訓練試行 3 試行ごとにテスト試行を 1 試行挿入することで、1 セッショ

ンに 6 試行を行った。

結 果

5 匹のラットの 1 種類の刺激を用いた訓練時から、3 種類に増加させた段階までの正反応率を Figure 3 に示した。チャンスレベルは 6 個の物体のうち偶然に 3 番目が選択される $16.67\%(1/6)$ である。1 セッション 24 試行における有意な遂行の臨界値は $33.33\%(8/24)$ である ($p = .035$)。5 匹すべてがこのチャンスレベルを有意に上回る成績に達した。

しかし、48 セッションまでの訓練では、5 匹とも正反応率の成績が 50% 以上までは達しなかった。遂行成績が低い水準に留まった原因として矯正法の問題点が考えられた。最初の 48 セッションではラットは正反応に至るまで何度も目標箱を選択することができた。これは、誤反応を行った際に、物体刺激の配列の再知覚の機会を与えることで学習の促進を促すことを意図した手続きであった。しかし、この正反応に至るまで目標箱を選択し続けることができるといふ矯正法の性質が、誤反応を抑制するという点では妨害的に作用した可能性が考えられる。そこで、引き続き、誤反応時の再選択を 1 回だけに制限して訓練を行った。この段階では、2 回目の選択が誤反応の場合には、その時点でラットを装置から取り除いた。この訓練を 14 セッション行った。その結果、5 匹とも 50% を超える成績を示すようになった。

Figure 4 に物体総数変更テストの結果を示した。総物体数を訓練時の 6 個から 4 – 6 個に変更した効果は認められなかった ($F(2, 8) = .278, p = .764$)。物

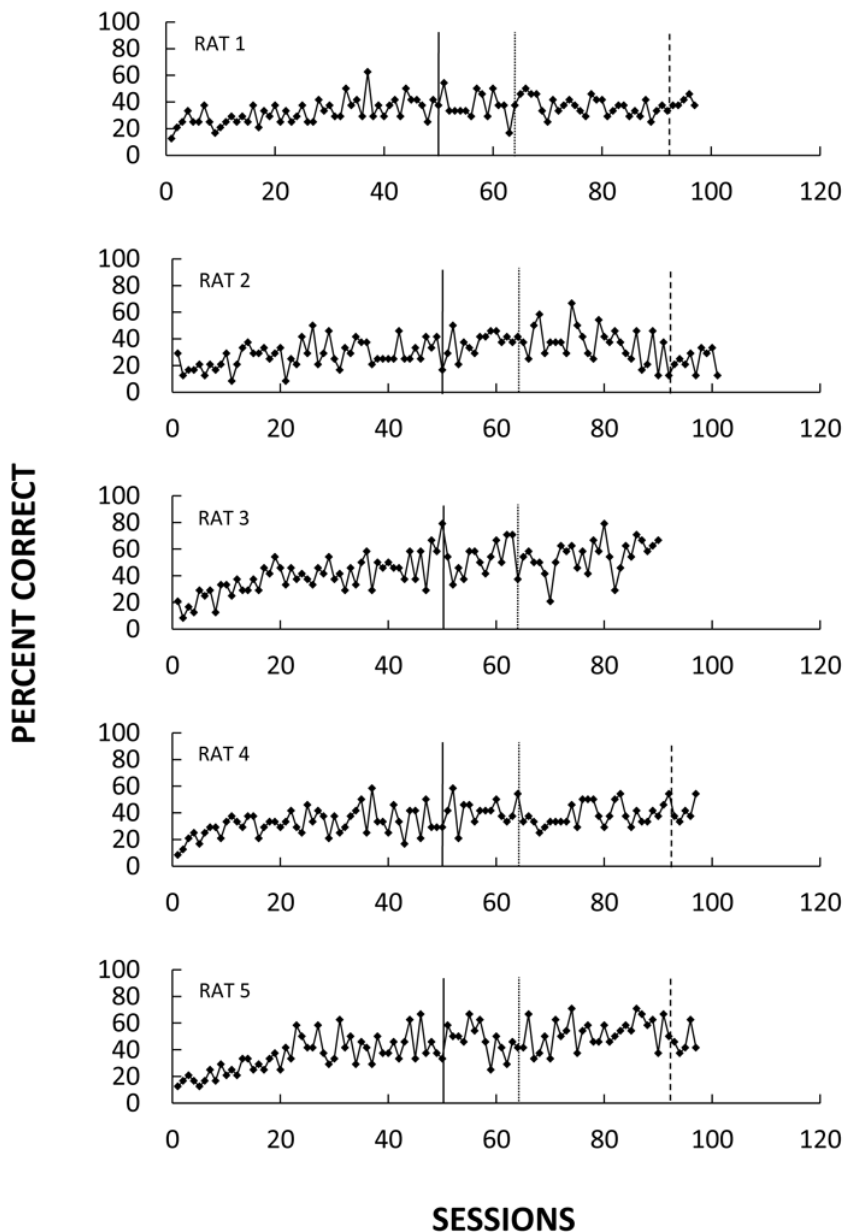


Figure 3 Percentage of correct responses during acquisition training. Solid lines represent when rats were started to train in noncorrection method. Dotted lines represent when the number of stimuli was changed across 4, 5 and 6. Broken lines represent when stimulus types increased to three (A, B, and C).

体総数が変化すると、左から3番目という正刺激の物体配列内での相対的な位置は変更する。また、物体配列の右から計数を行った場合の正刺激の位置も変化する。

したがって、物体総数の変更が正反応率に影響しなかったという結果は、物体配列内の相対的な位置を手がかりとして利用した可能性や右からの計数の可能

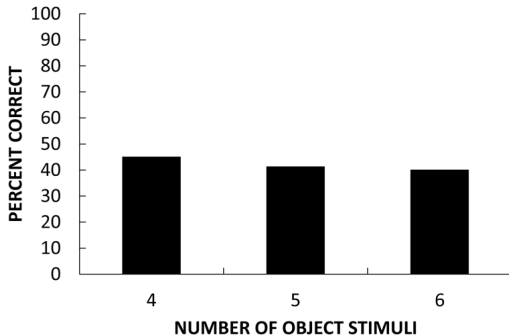


Figure 4 Percentage of correct responses when the total number of the object stimuli changed across 4, 5, and 6.

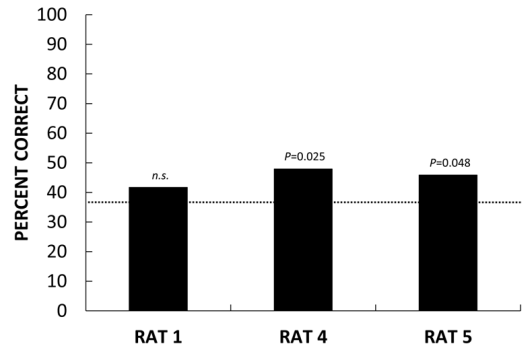


Figure 5 Percentage of correct responses for novel object D in the transfer test. The dotted line represents chance level (33.3%).

性を排除するものであると考えられる。

Figure 5 に新奇刺激 D に対する転移テストの結果を示した。ラット 3 は腫瘍が発生して肥大化したため、ラット 2 は実験期間内に学習基準に到達できなかったため、新奇刺激を用いたテストを行わなかった。テスト試行を反復したことによる学習の効果を統制するため、新奇刺激を用いたプローブ試行では左から 3 番目だけではなく、第 2, 3, 4 番目の物体に対する反応を強化した。また、この統制により、目標箱のドアの開閉操作を手がかりとした可能性も統制した。すなわち、ラットがテスト試行における強化随伴性に基づいて新奇刺激に対する正反応を新たに学習した場合、または、目標箱のドアの開閉操作を知覚して手がかりとした場合には、第 2, 3, 4 番目の物体に対して等しく反応することが期待され、チャンスレベルは $1/3 = 33.3\%$ となる。その結果、ラット 4 とラット 5 が、新奇なテスト刺激に対してこのチャンスレベルを有意に超える遂行を示した (ラット 4: $p = .025$, ラット 5: $p = .048$, 二項検定, 片側)。ラット 1 についてもテスト刺激の 3 番目の物体を選択する傾向が認められたが、有意水準には至らなかった ($p = .142$, 二項検定, 片側)。

考 察

本研究では、ラットにおける物体刺激を用いた数的な弁別学習の成立と新奇刺激への転移について吟味することにより、げっ歯目における計数対象に関わらない抽象的な基数概念の獲得可能性について検討した。その結果、物体の数的弁別課題の習得訓練では、5 匹のラット全てが 1 種類の刺激を用いた訓練を有意な水準で習得することが可能であることが示された。実験

を通じて、餌報酬はすべての目標箱に置かれたため、嗅覚手がかりが利用された可能性は排除される。また、刺激物体の総数を 4 個、5 個、6 個の 3 通りに変更したテスト結果からは、物体配列内の相対的な位置関係から正刺激を同定した可能性は排除される。例えば、刺激総数が 6 個の場合には、配列を 2 分するような中央となる点を同定し、その左側にある物体に反応することで正反応が可能になる。しかし、物体総数が 4 または 5 個に変更されると、このような刺激配列における正刺激の相対的な位置関係は変化する。したがって、刺激物体の総数の変更が正反応率に影響しなかったという本研究の結果は、ラットが物体配列における正刺激の相対的な位置関係を手がかりとした可能性を排除すると考えられる。また、この結果は、右からの計数の可能性も排除する。もし、ラットが右端の物体から計数を行った場合、物体総数が 6 個の場合には、右から 4 番目の物体が正刺激となるが、物体総数が 4 または 5 個に変更されると、右端からの正刺激の位置は、それぞれ 2 番目、3 番目となる。したがって、刺激物体の総数の変更が正反応率に影響しなかったという本研究の結果からは、ラットが右端からの位置で物体を同定した可能性も排除可能であると考えられる。

このように嗅覚手がかり、配列内の相対的位置、または物体配列の右側からの計数といった手がかりや方略は、本研究の習得訓練におけるラットの遂行を説明不可能であると考えられる。一方で、3 種類の訓練刺激による習得訓練後に行った新奇刺激を用いた転移テストでは、2 匹のラットにおいて有意な転移が示された。ラットが訓練刺激について、数的手がかりではなく、何らかの刺激特異的な手がかりを利用した場合に

は、新奇な刺激に対する即座の転移は予測されない。したがって、新奇刺激に対して示された有意な転移は、ラットにおける抽象的な基数概念の獲得を示唆する結果であると考えられる。

さらに、補足的な結果として、本研究において物体刺激を1種類から3種類に増加させた際に、4匹中3匹のラットでは成績の低下は見られず、3種類での訓練の開始後すぐに学習基準に達した。学習基準に達しなかったラット2は、刺激物体を3種に増加させる以前から正反応成績が低下傾向にあったため、学習基準を達成できなかった原因は、物体の種類増加によるものではないと考えられる。もし、ラットが最初に訓練を受けた物体刺激Aに対して何らかの刺激特異的な手がかりを基に反応することを学習したならば、刺激物体の種類増加に伴い、追加された物体B、Cには新たに刺激特異的な手がかりを学習することが必要となるため、遂行成績の低下が示されるはずである。したがって、訓練刺激の増加に対して遂行成績が維持されたという結果もまた、ラットが刺激特異的な学習ではなく、異なる刺激間に共通して適用可能な抽象的な手がかりを獲得した可能性を示すと考えられる。

霊長目や鳥類の計数研究では、多様な刺激を用いた計数訓練と新奇刺激への転移が確認されてきた。例えば、アカゲザルにおける研究では、幾何学図形やチョウなどの様々な形や大きさの図形を用いて、配置、組み合わせを変更しても、数に対して正確に反応することが可能であることが示されている (Brannon & Terrace, 1998, 2000)。この実験では、図形の総面積やディスプレイ内で占める範囲などの様々な手がかりになり得る要因が統制されていた。これに対し、従来のラットの計数研究では、訓練には、純音、接触刺激、または電撃などの1種類の刺激しか用いておらず、質的に異なる新奇刺激への転移を確認した研究は行われていない (Breukelaar & Dalrymple-Alford, 1998; Davis & Albert, 1986; Davis & Memmott, 1983)。このため、霊長目や鳥類で示されてきたような高い水準での基数概念の抽象性は証明されてこなかった。これに対し、本研究では、大きさや形状において異なる3種類の刺激物体に対する計数課題の習得と、新奇物体への学習の転移が確認された。この結果は、従来のラットの計数研究よりも、霊長目や鳥類で行われてきた方法により近い手続きによる結果であり、ラットにおける抽象的な基数概念の獲得可能性をより明確に示すものであると考えられる。

しかしながら、検討すべき問題も残っている。第1に、本研究において確認された新奇刺激への有意な転移は、2匹という少数例に留まる。今回の実験では、使用する刺激の組み合わせを無作為に設定したが、転移を示した2匹のラットは、刺激物体A、B、Cと新奇刺激Dとの間の何らかの物理的な類似性に反応した可能性も考えられる。この問題について検討するためには、さらに多様な物体刺激の組み合わせにおける転移傾向の一般性を確認することが必要であると考えられる。

また、第2に、本研究の訓練段階におけるラットの遂行成績は、比較的に低い水準に留まった。ラットの基数性の獲得についてより厳密に証明するための各種の検討を行うためには、習得段階における基本的な遂行成績を向上させる必要があると考えられる。今回用いた装置では、床面から目標箱の入口までに高さを設けることによって反応に対する負荷を増加させ、誤反応を抑制するよう試みた。これまでに、ラットの放射状迷路学習において、アームの傾度や長さといった反応負荷が誤反応を抑制する要因であることが示されている (Brown, 1990; Brown & Huggins, 1993; Brown & Lesniak-Karpiak, 1993)。ラットの計数研究においても、反応負荷等の要因を考慮した改良を行うことにより、より高い遂行水準における計数行動を確立する手続きを検討する必要があると考えられる。

さらに、本研究では3種類の物体刺激を用いた習得訓練後の転移について検討したが、より多様な刺激を用いて訓練を行う必要があると考えられる。サルやハトにおける抽象的な異同の関係概念の研究では、訓練に用いられる刺激の多様性が、刺激特異的な学習ではなく、抽象的な概念形成を促す要因であることが示されている。すなわち、サルやハトでは、習得訓練に用いられる刺激例数が少ない場合には、刺激配列の形態といった刺激特異的な手がかりによる学習が行われるが、刺激例数の増大に伴って、新奇刺激への転移傾向で示される抽象的な異同概念の獲得傾向が増大することが知られている (Katz & Wright, 2006)。刺激特異的な学習は刺激の物理的特徴の学習であるため単純な符号化しか要しないが、刺激例数が増加すると記憶しなければならぬ手がかりが増加するため、学習に必要な記憶負荷が増大する。この場合に、多様な刺激に対する共通的な手がかり、すなわち数や異同等の抽象的な特徴を符号化することが可能であれば、学習に必要な記憶負荷を低減できると考えられる。すなわ

ち、基数性の学習は、数という抽象的な性質に関する高次な符号化が必要であるが、多様な刺激の学習に必要な記憶負荷を低減できる処理方略であると言える。このように、ラットにおいても多様な訓練刺激を用いることで、刺激特異的な手がかりの学習可能性を低減し、抽象的な数概念の符号化を促すことで、基数性の獲得についてより詳細な水準での検討が可能になると考えられる。

ラットにおける計数学習の基本的遂行成績を向上させる要因、および抽象的な数手がかりの符号化を促進する要因について再検討を加え、ラットにおける数概念の獲得可能性についてさらなる検討を行うことが必要であると考えられる。

引用文献

- Biro, D., & Matsuzawa, T. (1999). Numerical ordering in a chimpanzee (*Pan troglodytes*): Planning, executing, and monitoring. *Journal of Comparative Psychology*, **113**, 178–185.
- Boysen, S. T., & Berntson, G. G. (1989). Numerical competence in a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, **103**, 23–31.
- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (1998). Ordering of the numerosities 1 to 9 by monkeys. *Science*, **282**, 746–749.
- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1–9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, **26**, 31–49.
- Breukelaar, J. W. C., & Dalrymple-Alford, J. C. (1998). Timing ability and numerical competence in rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, **24**, 84–97.
- Brown, M. F. (1990). The effects of maze-arm length on performance in the radial-arm maze. *Animal Learning & Behavior*, **18**, 13–22.
- Brown, M. F. & Huggins, C. K. (1993). Maze-arm length affects a choice criterion in the radial-arm maze. *Animal Learning & Behavior*, **21**, 68–72.
- Brown, M. F. & Lesniak-Karpiak, K. B. (1993). Choice criterion effects in the radial-arm maze: Maze-arm incline and brightness. *Learning and Motivation*, **24**, 23–39.
- Capaldi, E. J., & Miller, D. J. (1988). Counting in rats: Its functional significance and the independent cognitive processes that constitute it. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, **14**, 3–17.
- Davis, H., & Albert, M. (1986). Numerical discrimination by rats using sequential auditory stimuli. *Animal Learning and Behavior*, **14**, 57–59.
- Davis, H., & Bradford, S. A. (1986). Counting behavior by rats in a simulated natural environment. *Ethology*, **73**, 265–280.
- Davis, H., MacKenzie, K. A., & Morrison, S. (1989). Numerical discrimination by rats (*Rattus norvegicus*) using body and vibrissal touch. *Journal of Comparative Psychology*, **103**, 45–53.
- Davis, H., & Memmott, J. (1983). Autocontingencies: Rats count to three to predict safety from shock. *Animal Learning and Behavior*, **11**, 95–100.
- Gelman, R. & Gallistel, C. R. (1978). The child's understanding of number. Harvard University Press.
(ゲルマン, R. & ガリステル, C. R. 小林芳郎・中島実 (共訳) (1989). 数の発達心理学 田研出版)
- Katz, J. S., & Wright, A. A. (2006). Same/different abstract-concept learning by pigeons. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, **32**, 80–86.
- Matsuzawa, T. (1985). Use of numbers by a chimpanzee. *Nature*, **315**, 57–59.
- Pepperberg, I. M. (1994). Numerical competence in an African Gray Parrot (*Psittacus erithacus*). *Journal of Comparative Psychology*, **108**, 36–44.
- Pepperberg, I. M. (2012). Further evidence for addition and numerical competence by a Gray parrot (*Psittacus erithacus*). *Animal Cognition*, **15**, 711–717.
- Suzuki, K. & Kobayashi, T. (2000). Numerical competence in rats (*Rattus norvegicus*): Davis and Bradford (1986) extended. *Journal of Comparative Psychology*, **114**, 73–85.
- Xia, L., Emmerton, J., Siemann, M., & Delius, J. D. (2001). Pigeons (*Columba livia*) learn to link numerosities with symbols. *Journal of Comparative Psychology*, **115**, 83–91.
- Xia, L., Siemann, M., & Delius, J. D. (2000). Matching of numerical symbols with number of responses by pigeons. *Animal Cognition*, **3**, 35–43.

(2012年7月10日受稿, 8月9日受理)